Über das magnetische Verhalten von Eisenpulver verschiedener Dichte.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät

der

Friedrich-Alexanders-Universität Erlangen

vorgelegt von

Walter Trenkle
aus Regensburg.

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 1904.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

Erlangen.
K. b. Hof- u. Univ.-Buchdruckerei von Junge & Sohn.
1905.

148

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41542702_0101

Meinem Vater

und der Erinnerung an meine Mutter

in herzlicher Dankbarkeit gewidmet.

Einleitung.

Als Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit diente die im Jahre 1874 veröffentlichte Arbeit von R. Börnstein: Über das Verhältnis des temporären Magnetismus zur magnetisierenden Kraft und seine Beziehungen zur Wechselwirkung der Metallteilchen[1]).

Börnsteins Versuche sollten „über die Wechselwirkung der Metallteilchen in Magnetkörpern Aufschluß geben" und „wurden mit Stäben angestellt, die auf chemischem Wege bereitet, die magnetisierbaren Metalle Eisen, Nickel und Kobalt chemisch rein, teils ohne Zusatz, teils innig gemengt mit Tonerde enthielten".

Mit Hilfe der bekannten, zuerst von Gauß angegebenen Methode untersuchte Börnstein den Zusammenhang zwischen magnetisierender Kraft und „temporärem Magnetismus" der angegebenen pulverförmigen Substanzen, um daran eine theoretische Diskussion der erhaltenen Resultate zu knüpfen.

Ohne nun auf die Ergebnisse dieser Diskussion zunächst einzugehen, stellte ich mir, einer Anregung von Herrn Prof. Dr. E. Wiedemann folgend, vorerst die Aufgabe, lediglich die Resultate der Börnsteinschen Versuchsreihen für Eisen einer vergleichenden Nachprüfung mit den aus eigenen Versuchsreihen erhaltenen Kurven zu unterwerfen und etwa festzustellen, wie weit sich Börnstein einem Maximum der Magnetisierung ge-

[1]) Ber. d. math.-phys. Kl. d. kgl. sächs. Ges. d. Wiss. vom 29. Juni 1874.

nähert hatte, bezw. ob die bisher ausschließlich angewendete Magnetometermethode überhaupt zur Erlangung dieses Maximums ausreiche. Im Anschluß daran sollte dann der Versuch gemacht werden, die neueren ballistischen Methoden auf die Untersuchung der Magnetisierbarkeit von Eisenpulver anzuwenden und eventuell mit ihrer Hilfe den Verlauf der Magnetisierung in seinem vollständigen Umfang zu verfolgen.

Die Betrachtung der Börnsteinschen Kurven läßt nämlich erkennen, daß der Beobachter bei keinem der untersuchten Stäbe ein Maximum der Magnetisierung zu erreichen vermochte, ja bei den meisten sogar weit davon entfernt geblieben ist, was bezüglich einiger Stäbe auch ausdrücklich erwähnt wird. Zudem konnte auch J. Haubner bei seinen mit der Magnetometermethode angestellten Untersuchungen „Über das magnetische Verhalten von Eisenpulvern verschiedener Dichten“[1]) das bereits vor Eintritt des Maximums der Magnetisierung liegende „Maximum der Magnetisierungsfunktion nicht erreichen“, und ebenso konstatiert A. v. Waltenhofen in seiner Arbeit „Über das magnetische Verhalten des pulverförmigen Eisens“[2]) unter Bezugnahme auf die Resultate seiner ebenfalls mit der Magnetometermethode angestellten Versuche: „Was sofort in die Augen fällt, sind die verhältnismäßig sehr geringen Magnetisierungen, die das pulverförmige Eisen selbst bei Anwendung starker Ströme angenommen hat.“

Dies wurde mir Anlaß, mich vorerst durch die Ausführung eigener Versuche mit der Magnometermethode von der prinzipiellen Schwierigkeit zu überzeugen, auf diesem Wege ein Maximum der Magnetisierung bei pulverförmigem Eisen zu erreichen.

I. Teil.

1. Anordnung der Versuche mit dem Magnetometer.

Die Versuchsanordnung, die ich hierbei benutzte, war die folgende:

Der Mittelpunkt des Glockenmagneten eines als Magnetometer dienenden Wiedemannschen Galvanometers lag in einer

[1]) Sitzungsber. d. Wiener Akad. 1881, Bd. 83, S. 1167.
[2]) Wiedem. Ann., Neue Folge Bd. VII, S. 415. 1879.

Geraden mit der Achse einer Magnetisierungsspirale von 35 cm Länge so, daß die definierte Gerade senkrecht zum magnetischen Meridian lag. Die Magnetisierungsspirale besaß 1174 Windungen isolierten Kupferdrahtes in 6 Lagen bei einem mittleren Durchmesser von 3 cm. Der Mittelpunkt der zylindrischen Stäbe und zugleich der Mittelpunkt der sie umschließenden Magnetisierungsspirale war je nach der benötigten Empfindlichkeit der Anordnung verschieden weit entfernt vom Mittelpunkt des Glockenmagneten, worüber bestimmte Angaben an geeigneter Stelle noch folgen. Jeder Stab war symmetrisch in einem durchbohrten Kork befestigt und konnte mit diesem so in die Spirale hineingeschoben werden, daß seine Achse mit der Achse der Spule möglichst genau zusammenfiel.

Zur genauen Einstellung der Stäbe diente die folgende Vorrichtung. Auf einem Messingstab waren im genauen Abstand der Endflächen der Spirale zwei Marken eingefeilt; derselbe war parallel mit den zu untersuchenden Stäben ebenfalls durch den Kork gesteckt, so daß der Mittelpunkt des Markenabstandes und mit ihm der Mittelpunkt der Stäbe gerade dann in einer durch den Mittelpunkt der Spule gehenden und auf deren Achse senkrecht stehenden Ebene lagen, wenn die beiden Marken in die Endflächen der Spule fielen.

Der von der Magnetisierungsspirale herrührende Teil der Ablenkung wurde kompensiert durch eine zweite Spirale mit 575 Windungen isolierten Kupferdrahtes. Dieselbe war ebenfalls axial senkrecht zum magnetischen Meridian auf entgegengesetzter Seite des Magnetometers orientiert und war in einen Stromkreis geschaltet mit der Magnetisierungsspirale.

Den magnetisierenden Strom lieferte die 110-Voltanlage des hiesigen physikalischen Instituts unter Benutzung eines Vorschaltwiderstandes von 1—18 Glühlampen in Parallelschaltung, wobei jede Lampe ca. 0,5 Ampère durchließ. Zur Messung der magnetisierenden Stromstärken diente ein Präzisionsamperemeter von Reiniger & Cie. in München mit 0,05 Ampère als Einheit der Skaleneichung, während die Magnetometerablenkungen mit Fernrohr und Millimeterskala in wechselnden Abständen vom Magnetspiegel abgelesen wurden.

In der hiermit beschriebenen Weise unternahm ich nun zunächst eine Reihe von Untersuchungen mit festem, stab-

förmigen Material aus weichem Eisen, Gußeisen und Stahl. Die untersuchten Stäbe hatten zylindrische Gestalt; ihre Länge betrug 20,3 cm, ihr Durchmesser 1,5 cm, so daß sie im Feld in erster Annäherung der Form eines nach der großen Hauptachse magnetisierten Ellipsoids entsprachen, womit die theoretische Bedingung für das Auftreten eines konstanten, der Magnetisierung proportionalen Wertes der „entmagnetisierenden Intensität“ fürs erste angenähert erfüllt war. Die Entfernung des Stabmittelpunktes vom Mittelpunkt des Glockenmagneten betrug 150 cm.

Bezüglich der Resultate dieser einleitenden Versuche mit festem Material bemerke ich nur, daß ich bei allen hierbei in Frage kommenden Messungen mit der Magnetometermethode eine Annäherung an ein Maximum der Magnetisierung zu erreichen vermochte. Das Maximum der hierbei angewandten Stromstärke betrug 6 Ampère.

2. Herstellung der Stäbe aus Eisenpulver.

Nach Erledigung der hiermit beschriebenen Versuche ging ich an die Herstellung des pulverförmigen Eisens bezw. der Gemische von Eisenpulver mit Tonerde als unmagnetisierbarer Substanz. Dabei schlug ich zuerst den von Börnstein angegebenen Weg des chemischen Verfahrens ein.

Aus verschieden konzentrierten, gemischten Lösungen von Eisensulfat und Aluminiumsulfat fällte ich mit Ammoniak das Ferrohydroxyd, zusammen mit dem Aluminiumhydroxyd, worauf der erhaltene Niederschlag filtriert und getrocknet wurde. Durch kräftiges Glühen im Gebläse wurde derselbe dann in ein pulverförmiges Gemenge von Ferrioxyd und Tonerde übergeführt und schließlich im Wasserstoffstrome reduziert.

Dabei zeigte sich nun die Tatsache, daß trotz eines mehrstündigen Reduktionsprozesses im chemischen Verbrennungsofen bei mindestens 1000° C. und trotz der Anwendung eines ziemlich kräftigen elektrolytischen Wasserstoffstromes, unter Vorlegung einer Trockenflasche, selbst geringe Oxydmengen von 20—40 g sich nicht vollkommen reduzieren ließen. Die rote Farbe des Eisenoxyds war wohl vollkommen verschwunden, und die Wasserstoffabsorption hatte ebenfalls vollkommen auf-

gehört, allein trotzdem erwies sich das erhaltene schwarze Pulver bei der magnetometrischen Prüfung nur als sehr schwach magnetisierbar, während gleich konzentrierte mechanische Mischungen aus Eisenpulver und Tonerde unter gleichen Umständen der Anordnung sehr gut meßbare Magnetisierungen ergaben.

Diese Wahrnehmung schien darauf hinzudeuten, daß die Reduktion des Eisenoxyds in dem gemeinsam mit dem Aluminiumhydroxyd gefällten Niederschlag nur in sehr unvollkommener Weise möglich ist, namentlich wenn es sich um größere Beimengungen von Aluminiumhydroxyd handelt.

Dadurch wäre aber gerade der Vorteil illusorisch gemacht, den das chemische Verfahren bei der Herstellung der Mischungen bieten soll, nämlich die Garantie einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der unmagnetisierbaren Beimengungen.

Deshalb sah ich in der Folge ab von der Anwendung des chemischen Verfahrens und begnügte mich damit, in der beschriebenen Weise nur die Tonerde für sich darzustellen und nachher möglichst sorgfältige Mischungen derselben mit Eisenpulver (ferrum limatum) auszuführen, das ich zu diesem Zweck chemisch rein von der Firma E. Merck in Darmstadt bezog.

Die so erhaltenen pulverförmigen Massen wurden in kalibrische Glasröhren mit dem innern Durchmesser $d = 1{,}12$ cm eingefüllt und mit einem eingepaßten Stempel von beiden Seiten leicht zusammengedrückt, um ein ziemlich straffes, gleichmäßiges Gefüge zu erzielen. Hierauf wurden beiderseits streng passende zylindrische (nicht konische) Korke zum Abschluß eingeschoben, und der Abstand zwischen den sich scharf abhebenden Grenzflächen von Kork und Pulvermasse gab die Länge der Stäbe.

Das Eisenpulver erwies sich auch nach langem Liegen an der freien Luft bezüglich seines magnetischen Verhaltens bei zeitlich weit auseinander liegenden Messungen nicht nachweisbar oxydiert und konnte deshalb in den beschriebenen Glasröhren untersucht werden, ohne daß es notwendig gewesen wäre, die Füllung etwa in einer Wasserstoff- oder Stickstoffatmosphäre vorzunehmen.

Dagegen gebrauchte ich im Interesse eines möglichst gleichmäßigen Gefüges der Pulverstäbe die Vorsichtsmaßregel, die Füllung bei nahezu wagrechter Lage der Glasröhren vor-

zunehmen und jede Erschütterung derselben nach Möglichkeit zu vermeiden, damit die Gleichförmigkeit der hergestellten Mischung nicht durch die Verschiedenheit der spezifischen Gewichte von Tonerde und Eisen wieder gestört werde.

Aus den hiermit beschriebenen Mischungen waren indes nur die Stäbe der im folgenden mit A bezeichneten Versuchsreihe hergestellt. Für die Stäbe der Versuchsreihe B dagegen stellte ich mir Mischungen des Eisenpulvers mit Kupferbronze her, deren spezifisches Gewicht dem des Eisens bedeutend näher liegt, so daß diese Mischungen jedenfalls so gleichmäßig ausfielen, als es überhaupt bei mechanischer Herstellung möglich ist. Vorher hatte ich mich selbstredend noch magnetometrisch vergewissert, ob nicht einer eventuellen Magnetisierung der Kupferbronze dabei Rechnung zu tragen sei, doch vermochte ich keine Spur einer Magnetisierbarkeit nachzuweisen.

3. Abänderung der in Abschnitt 1 beschriebenen Versuchsanordnung für die Messungen mit Eisenpulver.

Unter den in Abschnitt 1 beschriebenen Umständen der Anordnung und unter Anwendung derselben magnetisierenden Stromstärken stellte ich nun auch die ersten Versuche mit den hergestellten Pulvern an. Der Abstand der Stäbe vom Mittelpunkt des Glockenmagneten betrug zunächst, wie bei den Versuchen mit massivem Eisen 150 cm.

Dabei ergab sich, daß der bei reinem Eisenpulver erreichte größte Wert der Magnetisierung nur wenig über dem kleinsten Wert der Magnetisierung des untersuchten Stahles lag. Daraus folgte aber die Notwendigkeit einer bedeutenden Verkürzung des Abstandes der Pulverstäbe vom Magnetometer, um die Empfindlichkeit der Anordnung so weit als möglich zu erhöhen.

Nun ist zwar die Empfindlichkeit der Methode für kleine Ablenkungen nahezu umgekehrt proportional der dritten Potenz des Abstandes der Stäbe, allein die hierdurch gegebene Möglichkeit einer wesentlichen Empfindlichkeitssteigerung durch Verkürzung des Abstandes der Stäbe vom Magnetometer bringt andererseits bei Überschreitung einer gewissen Grenze so große Nachteile mit sich, daß ich einen im Vergleich zur Länge der

Pulverstäbe so unverhältnismäßig geringen Abstand, wie ihn Börnstein anwandte, vermeiden zu sollen glaubte.

Vielmehr war bei meinen Versuchen in der Folge der Abstand des Mittelpunktes der Stäbe vom magnetischen Mittelpunkt des als „Nadel“ dienenden Glockenmagneten 62 cm, während gleichzeitig bei Versuchsreihe A die Länge der Stäbe 7,5 cm, bei Versuchsreihe B 11,5 cm betrug.

Mit der Verkürzung des fraglichen Abstandes wächst nämlich sehr bedeutend die Schwierigkeit der Kompensierung des von der Magnetisierungsspirale herrührenden magnetischen Einflusses, selbst wenn die kompensierende Spirale nur aus einer oder ganz wenigen Windungen besteht, so daß durch die Vergrößerung des Verschiebungsspielraums eine möglichst genaue Einstellung gewährleistet ist.

Hierzu äußert sich übrigens auch J. Haubner in der oben zitierten Arbeit: „ . . ., die Kompensationsrolle hätte der Magnetisierungsspirale bedeutend genähert werden müssen, was außer der Störung des magnetisierenden Feldes, die sich noch berechnen ließe, auch die unangenehme Folge hat, daß die Kompensation sehr schwierig und schon durch die geringste Erschütterung auch nur eines Drahtstückes aufgehoben wird.“

Dazu kommt noch der weitere Umstand, daß die Polabstände L der Stäbe bezw. l der Magnetometernadel in die Berechnung der jeweiligen magnetischen Momente notwendig eingeführt werden müssen, sobald der Abstand r des Stabmittelpunktes vom Mittelpunkt der Magnetometernadel nicht mehr relativ groß ist gegen die halbe Stablänge, d. h. es ist dann an Stelle der Gleichung

$$M = \frac{1}{2} r^3 H \operatorname{tg} \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

die für die erste Gaußsche Hauptlage geltende Gleichung

$$M = \frac{1}{2} \frac{r^3 H \operatorname{tg} \varphi}{1 + \frac{{}^1/_2 L^2 - {}^3/_4 l^2}{r^2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

anzuwenden, worin die Größen r, L und l die bereits angegebene Bedeutung haben, während H die Horizontalintensität des Erdmagnetismus, φ die Ablenkung der Magnetometernadel und M das jeweilig erreichte magnetische Moment des untersuchten Stabes bedeuten.

Ob sich nun die Korrektionskonstante $\eta = {}^1/_2\, L^2 - {}^3/_4\, l^2$ bezw. der in ihr enthaltene Polabstand L für die Pulverstäbe mit derjenigen Genauigkeit bestimmen lassen würde, die man sinngemäß für die Einführung einer Korrektur überhaupt verlangen muß, erschien mir aus dem Grunde fraglich, weil die übliche Bestimmung von L zu ${}^5/_6$ der Stablänge bei den Pulverstäben in ziemlich variabler Weise nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmte, soweit ich dies aus der Verteilung des remanenten Magnetismus längs der geometrischen Achse der Stäbe nach Beendigung der Versuche beurteilen konnte.

Zwar wäre noch eine Elimination der Korrektionskonstante η nach dem Prinzip des Gaußschen Verfahrens bei der Messung von $\frac{M}{H}$ möglich gewesen. Allein, da es hierbei notwendig ist, jede zu einer beliebigen magnetisierenden Stromstärke gehörige Ablesung am Magnetometer bei zwei verschiedenen Abständen des Stabes vorzunehmen, so wäre bei diesem Verfahren für mich die bedenkliche Schwierigkeit aufgetreten, daß ich für die zweite Ablesungsreihe nicht mit Sicherheit wieder auf genau die gleichen Stromstärken einzustellen vermocht hätte, weil für eine derartig präzise Abstufung bei den ebenso störenden wie unvermeidlichen Spannungsschwankungen in der Leitung der Glühlampenwiderstand unzureichend war.

Somit unterließ ich es, eine Erhöhung der Empfindlichkeit durch Abstandsverkürzung über das angegebene Maß hinaus anzustreben, wiewohl dadurch der Untersuchung von Pulvermischungen geringeren Eisengehaltes sehr bald eine untere Grenze gesetzt war.

4. Berechnung der magnetisierenden Felder.

Zur Berechnung der magnetisierenden Felder der Spirale diente die Gleichung

$$H = 0{,}4\,\pi\,n\,i,$$

worin die Konstante $0{,}4\,\pi\,n$ durch die Ampèrewindungszahl der Spirale gegeben war, während die Ablesungen am Präzisions-Ampèremeter unmittelbar die jeweiligen Werte für die magnetisierenden Stromstärken i ergaben.

Den Faktor

$$\frac{a}{\sqrt{a^2+4\varrho^2}}$$

in der korrekten Gleichung

$$H = 0{,}4\pi n i \frac{a}{\sqrt{a^2+4\varrho^2}}$$

mußte ich notgedrungen vernachlässigen, weil der mittlere Halbmesser ϱ der mir zur Verfügung stehenden Spirale nur bis auf etwa $\pm$ 4 mm genau bestimmt werden konnte. In jedem Falle aber war der Faktor

$$\frac{a}{\sqrt{a^2+4\varrho^2}}$$

für meine Spirale nicht kleiner als 0,99, so daß der begangene Fehler sicher unter 1 % blieb.

Anlaß zu einem Bedenken gab jedoch die Frage, ob das somit jeweilig für den Mittelpunkt der Spirale berechnete Feld auch genügend homogen sei für die Länge der axial und symmetrisch zum Mittelpunkt liegenden Stäbe.

Klarheit hierüber zu schaffen, war der Zweck einiger in dem fraglichen Bereich vorgenommener vergleichender Feldmessungen mittelst Induktionsprobespule. Dieselben ergaben für die halbe Länge der Stäbe A — beiderseits je 3,75 cm symmetrisch zum Mittelpunkt — eine Maximalvariation von nicht ganz 2 %; analog für die Stäbe B mit der halben Länge 5,75 cm eine Variation von 2,4 %.

Auf Grund des Ergebnisses obiger Feldmessungen glaubte ich das Solenoidfeld auch für die Länge der Stäbe B noch als homogen betrachten zu dürfen. Da das Verhältnis der Länge meiner Stäbe zu der Länge der Magnetisierungsspirale $\frac{1}{4{,}66}$ bezw. $\frac{1}{3{,}04}$ betrug, so befand ich mich dabei auch in Übereinstimmung mit einer Angabe von H. du Bois[1]), der für die Praxis „Spiralen von mindestens der dreifachen Länge des zu magnetisierenden Körpers“ für genügend erachtet mit der Bemerkung: „in dem von dem Körper eingenommenen Raum in der Mitte der Spule ist dann das Feld mit für die meisten Zwecke genügender Annäherung gleichförmig.“

[1]) H. du Bois, Magnetische Kreise, Berlin u. München 1894, S. 41.

5. Berechnung der Entmagnetisierung.

Eine weitere prinzipielle Schwierigkeit für die genaue Bestimmung der magnetisierenden Wirkung in der Spirale liegt bei der Anwendung der Magnetometermethode auf die Untersuchung pulverförmigen Eisens darin, daß die Berechnung der von den freien Magnetpolen herrührenden entmagnetisierenden Gegenwirkung nur mit unvollkommener Sicherheit ausgeführt werden kann, soferne man dem Material die in experimenteller Hinsicht so bequeme zylindrische Form gibt.

Wohl hat man es bei der Untersuchung massiven Stabeisens in der Hand, die zylindrische Form der Materialstäbe in ihrem Dimensionsverhältnis der von der Theorie geforderten Ellipsoidgestalt mit beliebiger Genauigkeit zu nähern, indem man den Durchmesser der Stäbe sehr klein wählt gegenüber ihrer Länge. Dabei kann die Stablänge immer noch im richtigen Verhältnis stehen zur Länge der Magnetisierungsspirale, ohne daß diese selbst unförmig lang zu sein braucht. Hingegen bei der Untersuchung pulverförmigen Materials kommt noch der Umstand in Betracht, daß die Gewichtsmenge des Eisens durch die Wahl des Dimensionsverhältnisses nicht über eine bestimmte Grenze hinaus verringert werden darf, weil sonst die Empfindlichkeit der Methode unzureichend wird für die relativ sehr geringen Magnetisierungen, auf die sich das Pulver unter dem Einfluß der Magnetisierungsspirale überhaupt bringen läßt.

Ist H_i die entmagnetisierende Gegenwirkung und J die Magnetisierung, so gilt für das Rotationsellipsoid von den Halbachsen c und a, unter der Voraussetzung, daß die Rotationsachse c parallel der Feldrichtung liegt und $c > a$, die Beziehung

$$H_i = PJ, \quad \ldots \quad 1)$$

wo

$$P = 4\pi \frac{1 - e^2}{e^3} \left(\frac{1}{2} \log \text{nat} \frac{1 + e}{1 - e} - e \right) \ldots \quad 2)$$

wenn

$$e = \sqrt{1 - \frac{a^2}{c^2}} \quad \ldots \quad 3)$$

die lineare Exzentrizität bedeutet. Für einen Kreiszylinder

von der Länge l und dem Durchmesser d gilt die Relation 2) um so näher, je größer $m = \frac{l}{d}$ ist, wobei die Relation 3) übergeht in

$$e = \sqrt{1 - \frac{1}{m^2}}.$$

Doch unterscheidet sich beispielsweise nach du Bois[1]) für einen Kreiszylinder vom Dimensionsverhältnis $m = 40$ der nach 2 berechnete Proportionalitätsfaktor P von dem tatsächlich richtigen Faktor P' noch um 11,7 %. Will man also etwa für einen zylindrischen Stab aus pulverförmigen Eisen das angegebene, noch ziemlich ungünstige Dimensionsverhältnis der Untersuchung und Berechnung zugrunde legen, so muß man den Durchmesser des Stabes bereits recht klein wählen, wenn die Länge desselben nicht gleichzeitig eine unförmige Länge der Magnetisierungsspirale nach den oben gemachten Angaben bedingen soll. Wählt man entsprechend der Länge der von mir verwendeten Spirale (35 cm), $m = \frac{l}{d} = \frac{10\text{ cm}}{0{,}25\text{ cm}} = 40$, so wird die dabei verwendbare Gewichtsmenge des Eisenpulvers bereits so klein, daß die Empfindlichkeit der Methode nicht mehr zu einer verlässigen Messung ausreicht, da der Empfindlichkeitssteigerung durch die in Abs. 4 dargelegten Schwierigkeiten eine bestimmte Grenze gesetzt ist. Insbesondere wird jede Messung vollkommen unmöglich, sobald das Eisenpulver in beträchtlicher Beimengung von unmagnetisierbaren Pulvern untersucht werden soll.

Bei der Bestimmung der Entmagnetisierungsfaktoren P der von mir verwendeten Stäbe verfuhr ich nun, wie folgt:

Für die Stäbe der Reihe B meiner Versuche mit dem Dimensionsverhältnis $m_B = \frac{11{,}4\text{ cm}}{1{,}12\text{ cm}} = 10{,}26$ stand mir die oben zitierte du Boissche Tabelle zur Verfügung, deren Werte graphisch durch Vergleich mit der normalen Magnetisierungskurve eines geschlossenen Toroids bestimmt sind. Die Interpolation aus dieser Tabelle lieferte jedenfalls einen Wert, der mit möglichster Genauigkeit der Wirklichkeit entsprach.

---

[1]) du Bois, Magnetische Kreise, Berlin und München 1894, S. 45.

Für die Stäbe der Reihe A mit dem Dimensionsverhältnis $m_A = \frac{7{,}5\ \text{cm}}{1{,}12\ \text{cm}} = 6{,}69$ war eine Interpolation aus der Tabelle nicht möglich, weil in derselben die Werte für den zugehörigen Interpolationsbereich fehlten, so daß ich genötigt war, die angenäherte Berechnung für P nach obiger Formel auszuführen. Dabei berücksichtigte ich jedoch die noch aus der Tabelle ersichtliche Tatsache, daß in der Nähe des in Betracht kommenden Wertes des Dimensionsverhältnisses der tatsächliche Wert des Entmagnetisierungsfaktors noch um ca. 15,2 % kleiner ist als der aus der theoretischen Formel für das Ellipsoid berechnete Wert.

6. Resultate der Messungen mit der Magnetometermethode.

Die Zahlenresultate meiner nach der Magnetometermethode ausgeführten Messungen habe ich tabellarisch im Anhang zusammengestellt.

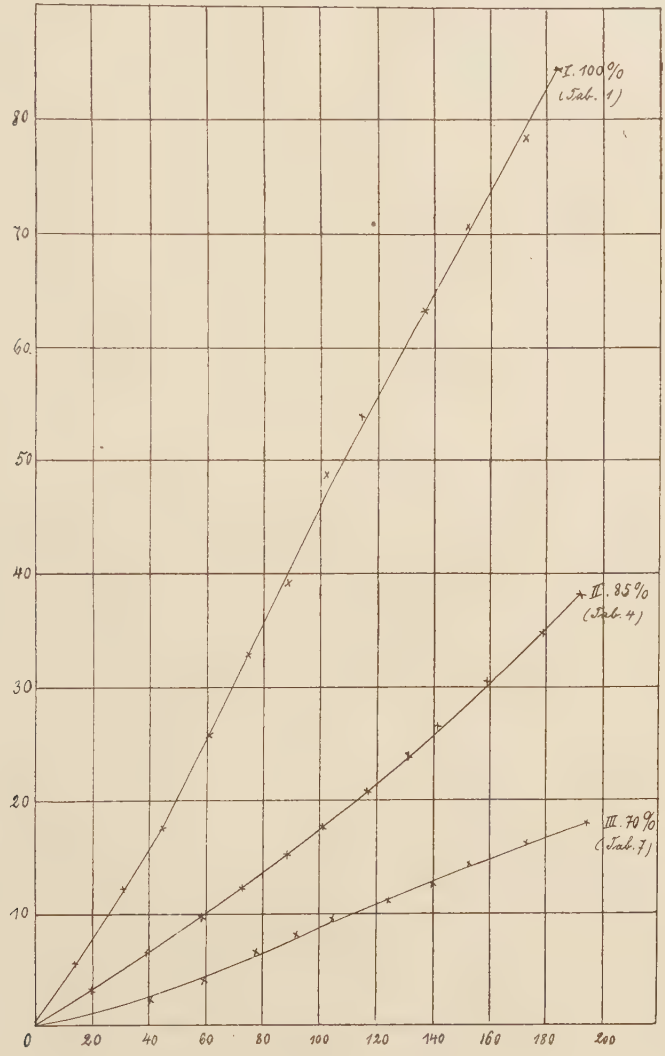
Die Tabellen der Versuchsreihe A enthalten unter H die magnetisierenden Feldstärken als $H = H' - H_i$, wo $H' = 0{,}4\,\pi\,n\,i$ nach der in Abs. 5 gegebenen Definition und $H_i = PJ$ nach den in Abs. 6 gemachten Angaben ist. Unter J stehen die magnetischen Momente der Volumeinheit, die Größen H und J sind in absoluten C. G. S.-Einheiten ausgedrückt.

Bei Versuchsreihe B habe ich nach Analogie der Börnsteinschen Tabellen unter J' die Werte von J auf gleiche Gewichtsmengen Eisen reduziert.

Die graphische Aufzeichnung der Resultate ist in der Weise ausgeführt, daß Fig. 1 die Abhängigkeit der Werte H (Abszissen) und J für einige Stäbe der Versuchsreihe A und Fig. 2 für die entsprechenden Stäbe der Versuchsreihe B darstellt.

Die Betrachtung der mit I. bezeichneten Kurven für reines Eisenpulver in diesen beiden Figuren zeigt trotz der wiederholt betonten Unsicherheit in der Berechnung der magnetischen Gegenwirkung eine sehr gute Übereinstimmung, während bei den folgenden Kurven für das verdünnte Pulver ziemlich beträchtliche Unterschiede auftreten. Dieselben dürften indes lediglich beweisen, daß es selbst bei sorgfältigster Herstellung der Mischungen kaum möglich ist, für zwei Stäbe von ein und

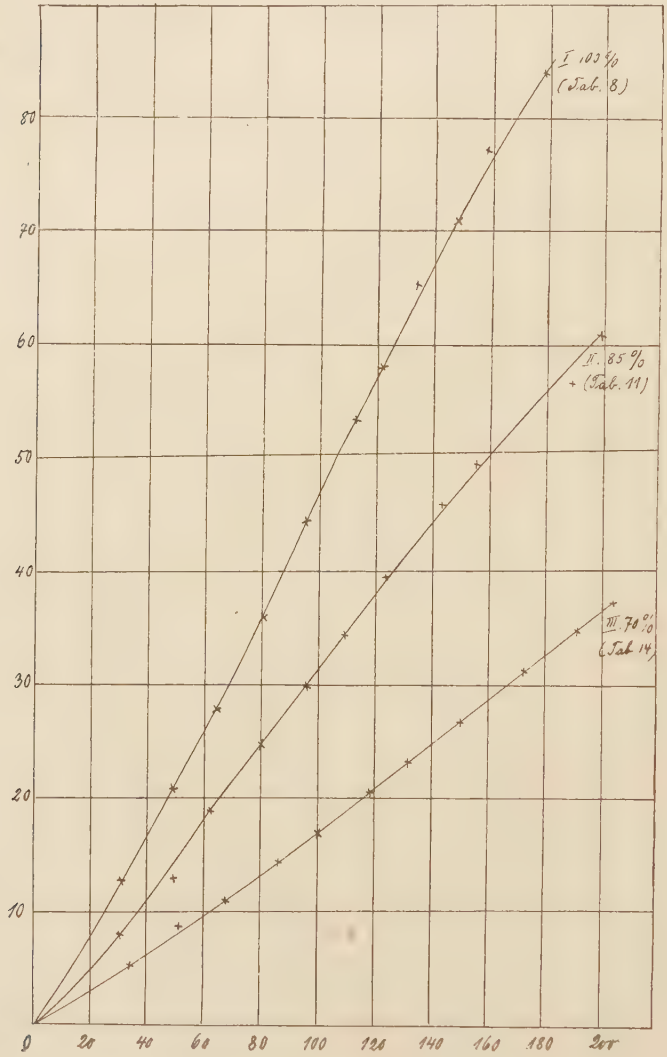
derselben Konzentration der Mischung ein absolut gleichmäßiges Gefüge zu erhalten.



Figur 1.

Die Gestalt und die Aufeinanderfolge sämtlicher Kurven — auch der in den beigefügten Figuren nicht wiedergegebenen — weist als Ergebnis die Tatsache nach, daß die Magnetisierung

des Eisenpulvers, d. h. das magnetische Moment der Volumeinheit, bei gleicher magnetisierenden Feldstärke mit ab-



Figur 2.

nehmender Dichte abnimmt. Diese Abnahme zeigt sich auch dann noch, wenn die Magnetisierungswerte nachträglich auf gleiche Gewichtsmengen Eisen bezogen werden.

Dieses von mir erhaltene Resultat steht in vollkommener Übereinstimmung mit der schon früher von Waltenhofen gemachten Wahrnehmung, daß die magnetischen Momente gleich schwerer Proben von lockerem Eisenpulver und von solchem, welches durch Zusammenklopfen verdichtet war, unter sonst gleichen Umständen für die ersteren kleiner ausfielen als für die letzteren.

Bezüglich der theoretischen Deutung des Resultats begnüge ich mich mit einem Hinweis auf die entsprechenden Ausführungen in der zitierten Arbeit Waltenhofens.

In einem scheinbar direkten Widerspruch hiermit steht dagegen das von Börnstein ausgesprochene Ergebnis: „Es zeigt sich in der Tat der Magnetismus der weniger dichten Masse durchgängig größer als der des reinen Eisens."

Aber so paradox dieses Ergebnis Börnsteins auch klingen mag, so ist der Widerspruch eben doch nur ein scheinbarer. Die Erklärung ergibt sich von selbst aus der von B. gebrauchten Definition des Begriffes „Magnetismus". B. leitet nämlich seine Resultate aus der tabellarisch und graphisch aufgestellten Abhängigkeit zwischen magnetisierender Kraft X und gesamtem temporärem Magnetismus Y ab, wobei mit dem Ausdruck „gesamter temporärer Magnetismus" das jeweilig erreichte gesamte magnetische Moment der Stäbe bezeichnet wird.

Nun war aber bei den von Börnstein untersuchten Stäben aus reinem Eisenpulver das Volumen stets kleiner als das der Stäbe aus Tonerdegemisch, indem die letzteren bei gleichem Durchmesser stets — zum Teil sogar sehr beträchtlich — länger waren als die Stäbe aus reinem Eisenpulver. Da aber das magnetische Moment direkt proportional ist dem mit zunehmender Länge wachsenden Polabstand, so konnten die ermittelten Momente der Stäbe aus Pulvergemisch — auch nach der Reduktion auf gleiche Gewichtsmengen Eisen — durchgängig größer sein als diejenigen der Stäbe aus reinem Eisenpulver. Man darf somit wohl folgern, daß diese Tatsache nicht eine Folge der weniger dichten Masse, sondern lediglich der größeren Stablänge war, um so mehr, als das Ergebnis einer Reduktion der Börnsteinschen Zahlen auf die Volumeinheit vollkommen im Einklang steht mit den von Waltenhofen und mir erhaltenen Resultaten.

Es zeigt sich also, daß bei dem Vergleich des Magnetisierungsverlaufes für Eisenproben verschiedener Dichte die bloße Reduktion der beobachteten magnetischen Momente auf gleiche Gewichtsmengen Eisen leicht zu mißverständlichen Ergebnissen führen kann. Überhaupt dürfte sich die ältere Definiton des Begriffes „spezifische Magnetisierung" als magnetisches Moment der Gewichtseinheit für die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Eisenmaterial weniger eignen als die jetzt allgemeingebräuchliche Definition, welche unter der Magnetisierung das auf die Volumeinheit entfallende Moment versteht, ohne auf die in dieser enthaltene Gewichtsmenge Eisen Rücksicht zu nehmen.

Auch die Börnsteinschen Zahlenreihen enthalten also implizite, d. h. nach Ausführung der Reduktion auf die Volumeinheit, das Resultat, daß die Magnetisierung bei gleicher magnetisierender Kraft mit abnehmender Dichte des Eisenpulvers abnimmt. Damit ändert sich aber auch die Grundlage für die Beweisführung zu einigen anderen von Börnstein gezogenen Folgerungen.

Ich erlaube mir, an dieser Stelle zunächst nur die folgende Aufstellung zu machen. Es ist durch die nachträgliche Reduktion der von Börnstein erhaltenen Zahlen, ferner durch die oben mitgeteilte Wahrnehmung Waltenhofens und zuletzt auch durch das in den Tabellen 1 bis 16 (S. 39) niedergelegte Ergebnis meiner eigenen zunächst mit der Magnetometermethode angestellten Messungen erwiesen:

1. Das magnetische Moment der Volumeinheit (J) sinkt bei gleicher magnetisierender Kraft (H) mit abnehmender Dichte;
2. infolgedessen ist es für den Verlauf der Magnetisierung nicht gleichgültig, ob man die in der Richtung der magnetisierenden Kraft liegende Dimension auf Kosten der anderen Dimensionen vergrößert, oder ob man die kleinsten Teilchen des Magneten durch Verdünnung seiner Eisenmasse voneinander entfernt.

Dementsprechend betrachtete ich es im folgenden als meine

Aufgabe, womöglich nun durch Versuche direkt festzustellen, in welcher Weise sich die unter 2 genannten und von B. zuerst verglichenen Formänderungen bezüglich ihres Einflusses auf den Verlauf der Magnetisierung unterscheiden.

II. Teil.

7. Theoretische Überlegungen.

Es ist eine feststehende Tatsache, daß die Veränderungen, die das Fortschreiten der Magnetisierung bei zunehmender Feldstärke unter dem Einfluß einer Änderung des Dimensionsverhältnisses des zu untersuchenden Eisenkörpers erleidet, sich in folgender Weise geltend machen[1]).

Die das Fortschreiten der Magnetisierung J mit zunehmender magnetisierender Feldstärke H darstellende Kurve mit den Ordinaten J und den Abszissen H zeigt sich stets um so weiter nach rechts, also von der Ordinatenachse weg, verschoben, je kleiner das Dimensionsverhältnis $\frac{l}{d}$ wird, wenn l die in die Feldrichtung fallende Dimension, d die darauf senkrecht stehende Dimension bedeutet, d. h. die von den freien Polen des, beispielsweise zylindrischen, Körpers herrührende und der magnetisierenden Feldstärke entgegenwirkende „entmagnetisierende Intensität“ ist um so größer, je kleiner das angegebene Dimensionsverhältnis ist. Für einen axial magnetisierten Zylinder oder für ein nach der großen Hauptachse magnetisiertes Ellipsoid wird demnach die betrachtete Verschiebung um so kleiner, je mehr die gestreckte Form dieser Körper hervortritt. Theoretisch gleich Null wird diese Verschiebung nur für den Fall, daß das fragliche Dimensionsverhältnis gleich unendlich wird. Die für diesen Fall erhaltene Kurve ist als Normalkurve für das betreffende Material zu betrachten und stimmt überein mit der Kurve, die durch die Untersuchung desselben Materials in Form eines geschlossenen Toroids erhalten wird. Bei einem ganz bestimmten Wert der Magnetisierung J erreicht nun die Magnetisierbarkeit des untersuchten Materials ihr Maximum, und dieses Maximum bleibt seinem absoluten Werte nach genau dasselbe,

[1]) Eingehendes über die Theorie s. H. du Bois, Magnetische Kreise, Berlin und München 1894, 2. Kap., S. 25 ff.

in welcher Form man auch das Material untersuchen mag. Wohl aber ändert sich der Wert der magnetisierenden Feldstärke, bei dem das Maximum erreicht wird, und zwar ist derselbe, entsprechend der oben erwähnten Verschiebung nach rechts, um so größer, je kleiner das Dimensionsverhältnis $\frac{l}{d}$ ist. Untersucht man also ein und dasselbe Material etwa in zylindrischen Formen von verschiedenen Dimensionsverhältnis, so müssen die sämtlichen erhaltener Kurven bei einem ganz bestimmten Werte der Ordinate J, dem Sättigungswerte, zusammentreffen und von da an in einem der Abszissenachse parallelen Kurvenzuge weiter laufen.

Was müßte nun, entsprechend dieser experimentell feststehenden Tatsache, folgen, wenn eine auf Kosten der anderen Dimensionen vorgenommene Vergrößerung der in der Richtung der magnetisierenden Kraft liegenden Dimension dieselben Folgen hätte wie die abnehmende Dichte des Eisens? Offenbar müßte mit abnehmender Dichte des Eisens bei gleichbleibender magnetisierender Kraft (H) die Magnetisierung (J) in demselben Verhältnis wachsen, in dem sie tatsächlich zugenommen hätte, wenn man statt einer Herabsetzung der Dichte eine bestimmte Vergrößerung des Dimensionsverhältnisses $\frac{l}{d}$ vorgenommen hätte. Mit anderen Worten, es müßte das Gesamtbild des Magnetisierungsverlaufs für Stäbe verschiedener Dichte, aber gleichen Dimensionsverhältnisses genau dem oben beschriebenen Aussehen der Magnetisierungskurven für Stäbe verschiedenen Dimensionsverhältnisses, aber gleicher Dichte entsprechen.

Dementsprechend hielt ich es nun für meine nächstliegende Aufgabe, durch weitere Versuche eine unmittelbare Entscheidung dieser Frage anzustreben. Gelang es auf irgendeinem einwandfreien Wege den Verlauf der Magnetisierung bis nahe zur Sättigungsgrenze zu verfolgen, so war der Entscheid von selbst gegeben.

Jedoch gerade hier lag die bereits im einleitenden Abschnitt angedeutete große Schwierigkeit, daß die Magnetometermethode vollkommen versagt, wenn es sich darum handelt, die Magnetisierung des Eisenpulvers ihrem Sättigungswerte nahe zu führen. Selbst Magnetisierungsspiralen von sehr

großer Ampèrewindungszahl reichen nämlich bei weitem nicht hin, um die für die magnetische Sättigung des Eisenpulvers nötigen magnetisierenden Felder zu erzeugen[1]). Wollte man das Ziel durch Anwendung entsprechend großer Stromstärken zu erreichen suchen, so würde man durch die dadurch bedingte Vergrößerung des Drahtquerschnittes, selbst bei Anbringung einer Kühlvorrichtung, zu unförmlichen Dimensionen der Magnetisierungsspirale kommen, weil eine ungenügende Ampèrewindungszahl die Anwendung großer Stromstärken wieder vollkommen zwecklos macht.

Als Maximum der Stromstärke konnte ich bei meiner Spirale mit 33,5 Windungen pro Zentimeterlängeneinheit im höchsten Falle 6 Ampère anwenden. Wie weit ich dabei von einem Maximum der Magnetisierung entfernt geblieben bin, zeigt der Anblick der in den Fig. 1 und 2 beigegebenen Kurven.

Auf diesem Wege war also an eine Erreichung des Zieles nicht zu denken.

In Ausführung eines Vorschlages von Herrn Professor E. Wiedemann ging ich infolgedessen daran, eine der neueren ballistischen Methoden, speziell die Jochmethode, trotz voraussichtlicher Bedenken und Schwierigkeiten, auf eine Verwendbarkeit für meine Zwecke zu erproben.

8. Versuche mit der Jochmethode.

Zur Verfügung stand mir ein ungefähr nach den Angaben der physikalisch-technischen Reichsanstalt gebautes magnetisches Schlußjoch. Über die Sekundärspule mit 38 Windungen war eine Primärspule mit 1617 Windungen gut isoliert gewickelt. Mit den durch die Spulen und die durchbohrten Eisenbacken des Joches gesteckten Materialstäben war der Apparat zum Versuch gebrauchsfertig.

Das zu untersuchende Pulver füllte ich, wie früher, wieder in Glasröhren, deren äußerer Durchmesser möglichst genau der Weite der Backenbohrung des Jochs und des inneren Hohl-

[1]) Vgl. auch die auf die Untersuchung massiven Eisens bezüglichen Angaben über die Leistungsfähigkeit von Stromspiralen bei Ewing, Magnetische Induktion in Eisen und verw. Metallen, Berlin und München 1892, § 91, S. 130.

raumes der Sekundärspule entsprach, so daß sie nach dem Durchschieben straff an diesen anlagen.

Den magnetisierenden Strom lieferte wieder die elektrische Anlage des physikalischen Instituts, deren Pole ich unter Vorschaltung des bereits erwähnten Parallelglühlampenwiderstandes an die Klemmen der Primärspule legte, so daß ich die magnetisierende Wirkung derselben in bestimmten Abstufungen steigern konnte, deren Größe ich an dem ebenfalls bereits früher benutzten Präzisionsampèremeter ablesen konnte.

Als ballistisches Galvanometer diente mir ein du Bois-Rubenssches Instrument mit zwei leichten Magnetsystemen und von ziemlich hoher Empfindlichkeit. Um die Schwingungsdauer für meine Zwecke möglichst groß zu machen, hatte ich die Magnetsysteme ziemlich stark astasiert. Dies hatte allerdings die unangenehme Folge, daß sich die Beeinflussung des Galvanometers durch das Feld der Primärspule des Jochs bei dessen Erregung nur mit vieler Mühe durch die Wahl einer großen Entfernung zwischen Joch und Galvanometer beseitigen ließ.

Die Klemmen der Sekundärspule des Jochs waren mit den Galvanometerklemmen verbunden unter Vorschaltung eines Widerstandes von 2000 Ohm bei ebenfalls 2000 Ohm innerem Widerstand des Galvanometers.

Das Mittel aus den beim Öffnen und Schließen des Primärstromes hervorgerufenen größten Ausschlägen des Galvanometers gab dann ein Maß für das im Sekundärkreis induzierte Integral elektromotorischer Kraft und damit auch ein Maß für die magnetische Induktion des Eisenpulvers unter dem Einfluß der entstehenden und verschwindenden Felder der Primärspule.

Zur Berechnung diente dann die Gleichung

$$Q \cdot w = \int E \, dt = q \, \mathfrak{B} \, n.$$

Dabei bedeutet Q die Elektrizitätsmenge des Induktionsstoßes, w den Gesamtwiderstand des Sekundärkreises, q den Querschnitt der Sekundärspule, n die Windungszahl derselben und $\mathfrak{B}$ die jeweilig erreichte magnetische Induktion.

Da aber $\mathfrak{B} = H + 4 \pi J$, wo H die magnetisierende Feldstärke der Primärspule ist, so berechnete sich J dann aus der Gleichung

$$J = \frac{1}{4 \pi q} \left(\frac{Q \cdot w}{n} - H \, q \right)$$

Aus der nach bekannten Methoden vorher bestimmten Empfindlichkeit C des Galvanometers und dem, wie immer, durch Spiegelablesung bestimmten größten Ausschlag α ergab sich

$$Q = C \frac{\tau}{\pi} k^{\frac{1}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\Lambda}} \alpha,$$

wo τ die durch den vorhandenen Widerstand des Sekundärkreises bedingte, möglichst genau bestimmte Schwingungsdauer des Galvanometers und Λ das zugehörige natürliche logarithmische Dekrement bedeuten.

Die Werte für H konnte ich hier nach dem Muster der von A. Ebeling und Erich Schmidt[1]) in der physikalisch-technischen Reichsanstalt für massives Stabeisen nach der Jochmethode ausgeführten Messungen aus der bereits in Abs. 5 angegebenen Gleichung

$$H = 0{,}4\,\pi\,n'\,i\,\frac{a}{\sqrt{a^2 + 4\,\varrho^2}}$$

berechnen.

Bezüglich der Resultate der hiermit kurz beschriebenen Versuche mit dem Joch kann ich mich auf die Angabe beschränken, daß diese Versuche es zwar ermöglichten, bedeutend höhere Werte der Magnetisierung zu erreichen, als die Versuche mit der Magnetometermethode ergaben, allein es war noch immer keine Andeutung von einer Annäherung an ein Maximum aus dem Charakter der graphischen Aufzeichnung des Resultates zu entnehmen.

Dabei hatte ich als magnetisierende Stromstärke wieder 6 Ampère im höchsten Falle angewendet. Höher konnte ich aus dem Grunde nicht gehen, weil die Primärspule sich sonst zu stark erwärmt hätte, und die Idee, die Spule in einen Kühler einzubauen, ließ sich infolge der knappen Abmessungen des Apparats nicht verwirklichen. Nach den Ergebnissen der in den letzten Absätzen vorliegender Arbeit noch mitgeteilten Versuche erscheint es überhaupt fraglich, ob sich die für die Untersuchung massiven Eisens ausgebildete Form des Schlußjoches soweit abändern läßt, daß eine Erreichung des Maximums der Magnetisierung auch für pulverförmiges Eisen möglich wird.

---

[1]) Vgl. z. B. E. Schmidt, Die magnetische Untersuchung des Eisens und verwandter Metalle, Halle a. S. 1900, S. 48.

Da ja der Hauptvorteil der Jochmethode in der fast vollkommen erreichbaren Beseitigung der „entmagnetisierenden Intensität“ durch die den Kraftlinienschluß vollziehenden Eisenbacken des Ringes liegt, so ist ein Hauptaugenmerk auf einen möglichst guten magnetischen Schluß zwischen den Materialstäben und diesen Eisenbacken zu richten. Bei festem Stabeisen läßt sich dies leicht durch Einspannung mittels kräftiger Schrauben erreichen. Hingegen ist bei pulverförmigem Material niemals der magnetische Widerstand der unvermeidlichen Glaswände der Röhren ganz zu beseitigen.

Aber selbst wenn eine möglichst vollständige Ausnützung der magnetisierenden Felder der Primärspule erreicht werden könnte, so würde die Leistungsfähigkeit derselben doch schwerlich so weit gesteigert werden können, als es für eine ganz vollkommene Magnetisierung des Eisenpulvers nötig ist.

Während nämlich der bei meinen Versuchen mit der Jochmethode erreichte größte Wert der Magnetisierung J für reines Eisenpulver etwas über 150 C.G.S.-Einh. lag, zeigten die Resultate meiner letzten Versuche, daß der Sättigungspunkt erst etwa bei dem doppelten Wert erreicht wird.

9. Abänderung der gebräuchlichen ballistischen Ringmethode.

Die nun im folgenden beschriebenen Versuche, durch eine etwas abgeänderte Anwendung des Prinzips der Jochmethode unter Zuhilfenahme eines großen zweipoligen Elektromagneten zu dem gewünschten Ziele zu kommen, stellen die praktische Ausführung eines Vorschlages dar, den ich Herrn Prof. Dr. A. Wehnelt verdanke.

Das unten näher zu beschreibende Verfahren ist im wesentlichen identisch mit der bereits im Jahre 1887 von J. A. Ewing und W. Low[1]) eingeführten „Isthmusmethode“, und aus den von Ewing gemachten Angaben[2]) geht hervor, daß sich die Idee dieser Methode ebenfalls aus der Erkenntnis der Un-

[1]) Proc. Roy. Soc., März 1887; Phil. Trans., 1889 A, S. 221.

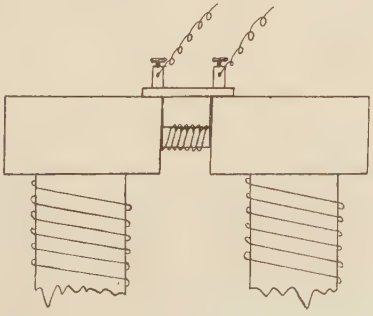
[2]) J. A. Ewing, Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen. Deutsche Ausgabe von L. Holborn und St. Lindeck, Berlin und München 1892.

möglichkeit ableitete, mit Hilfe der Felder einer Stromspule Sättigungswerte der Magnetisierung — und zwar für massives Stabeisen — zu erreichen. Dementsprechend wurde die Methode von den genannten Autoren mit großer Vollkommenheit für die Untersuchung massiven Metalls hinsichtlich des Maximums seiner Magnetisierung ausgestaltet.

So war zu erwarten, daß ein ähnliches Verfahren auch in meinem Falle zum Ziele führen und Aufschluß über die Sättigungsverhältnisse des pulverförmigen Eisens geben würde. Bei den ersten Versuchen verfuhr ich nun, wie folgt.

Auf zwei kurze Glasröhrchen von 1,4 cm Durchmesser und 4,2 cm Länge wickelte ich mir je eine kleine Spule aus 0,4 mm dickem, umsponnenem Kupferdraht mit 92 Windungen. Die Stirnflächen des einen Glasröhrchens schloß ich durch zwei sehr dünne Glasplatten von $(3\ \mathrm{cm})^2$ ab. Dieselben wurden mit Klebwachs leicht verkittet, und die Enden der aufgewickelten kleinen Probespule unter Vermittlung zweier Drahtstücke mit zwei Klemmschrauben verlötet. Bei dem anderen Glasröhrchen mit der aufgewickelten Probespule verschloß ich zunächst nur die eine Öffnung mit einer kleinen Glasplatte von den beschriebenen Dimensionen; die andere blieb offen, um eine Füllung des Röhrchens mit Eisenpulver ausführen zu können. Erst nachdem dies geschehen war, wurde die andere Öffnung in gleicher Weise abgeschlossen. Auch hier wurden die Enden der kleinen Probespule mit zwei Klemmschrauben verlötet.

Die so entstandenen Spulen wurden nun auf kleinen Brettchen montiert und konnten mit ihrer Hilfe so zwischen die Polschuhe eines großen Elektromagneten eingefügt werden, daß die Achse der Spulen parallel lag mit der Feldrichtung des erregten Elektromagneten, bezw. die Windungsfläche derselben senkrecht zu dieser Richtung stand. Die beigegebene Skizze möge dies veranschaulichen.



Figur 3.

Das Feld zwischen den Polschuhen erwies sich bei einer mittels Probespule an

verschiedenen Stellen vorgenommenen Prüfung als nahezu gleichförmig, und so waren alle Bedingungen für die Ausführbarkeit einer ballistischen Messung der Größen H und J erfüllt.

Eine Fehlerquelle, die das Ewing-Lowsche Verfahren für die Untersuchung massiven Metalls eliminiert, konnte ich allerdings bei meinen zylindrischen Pulverstäbchen nicht vermeiden. Ewing macht nämlich darauf aufmerksam, daß „bei einem kurzen Zylinder, der der Länge nach von einem Polschuh zum anderen reicht, an den Enden die Induktion denselben Wert wie an den angrenzenden Polschuhen, in der Mitte dagegen einen größeren Wert haben wird, da die Induktionslinien von Teilen, die in der Nachbarschaft der Polschuhe liegen, nach dem Probestück hin konvergieren und durch dessen Seiten eintreten.“ Ewing und Low beseitigen nun diesen Mangel dadurch, daß sie dem zu untersuchenden Stück die Form einer Spule geben, „deren mittlerer Hals kurz und dünn ist, während die Enden in konische Stücke auslaufen, die mit ihren breiten Flächen die Polschuhe bedecken.“

Da es indessen mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden gewesen wäre, auch das zu untersuchende Eisenpulver in eine derartige Form zu bringen oder die Polschuhe des mir zur Verfügung stehenden Elektromagneten zweckentsprechender umzugestalten, so behielt ich meine oben beschriebene Anordnung bei. Denn die quantitativen Resultate ballistischer Messungen können ja bei Eisenpulver wegen der unvermeidlichen Glashüllen, die in mehrfacher Hinsicht störend wirken, niemals denselben Anspruch auf absolute Genauigkeit machen wie die für massives Metall gefundenen Werte, während andererseits die qualitativen Unterschiede im Magnetisierungsverlauf für verschieden dichte Pulvergemische dadurch kaum beeinflußt werden können.

Die Ausführung meiner Versuche geschah nun in folgender Weise. Die Enden der kleinen Probespulen wurden durch Vermittlung der aufgesetzten Klemmschrauben unter Vorlegung eines Widerstandes von 2000 Ohm mit einem Deprezgalvanometer von 530 Ohm innerem Widerstand verbunden. Dieses Instrument war bei ziemlich hoher Empfindlichkeit durch sein eigenes starkes Magnetfeld vollkommen geschützt gegen eine von außen kommende Beeinflußung durch die Felder des Elektromagneten.

Bei gleicher Stromstärke brauchte ich nun nur unmittelbar nacheinander zuerst die leere Probespule einzusetzen und dann die mit Eisenpulver gefüllte. Das Mittel aus den (wegen der Remanenz der Polschuhe) um einen sehr geringen Betrag verschiedenen Ausschläge beim Schließen und Öffnen des magnetisierenden Stromes nahm ich dann als ein Maß einmal für die magnetisierende Feldstärke zwischen den Polschuhen, und zwar dann, wenn die leere Probespule eingesetzt war; zweitens aber auch für die magnetische Induktion in dem Eisenpulver, wenn die Probespule mit dem letzteren sich zwischen den Polschuhen befand.

Das einemal berechnete sich H aus der Gleichung

$$H = \frac{Q_1 \cdot w}{q\, n},$$

und das anderemal war

$$\mathfrak{B} = 4\,\pi\,J + H = \frac{Q_2 \cdot w}{q \cdot n};$$

hieraus berechnete sich J als

$$J = \frac{\mathfrak{B} - H}{4\,\pi}.$$

In diesen Gleichungen behalten sämtliche Größen die in Abs. 9 angegebene Bedeutung.

Für Q war wieder die ballistische Galvanometerkonstante C' aus der durch den Widerstand des Sekundärkreises bedingten Dämpfung und der Schwingungsdauer sowie der vorher bestimmten Empfindlichkeit C zu berechnen nach Maßgabe der Beziehung

$$C' = C\,\frac{\tau}{\pi}\,k^{\frac{1}{\pi}\,\mathrm{arc\,tg}\,\frac{\pi}{\Lambda}},$$

wobei eine zeitweilige Kontrolle der Konstante C nicht versäumt wurde.

Für den Fall, daß Spannungsschwankungen in der Leitung eine Änderung der den Elektromagneten erregenden Stromstärke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen mit den verschiedenen Probespulen bedingten, wurde ein Präzisionsampèremeter in den Stromkreis geschaltet, das Änderungen von 0,01 Ampère leicht erkennen und dementsprechend die fraglichen Beobachtungen eliminieren ließ.

10. Resultate der Messungen mit dem Elektromagneten.

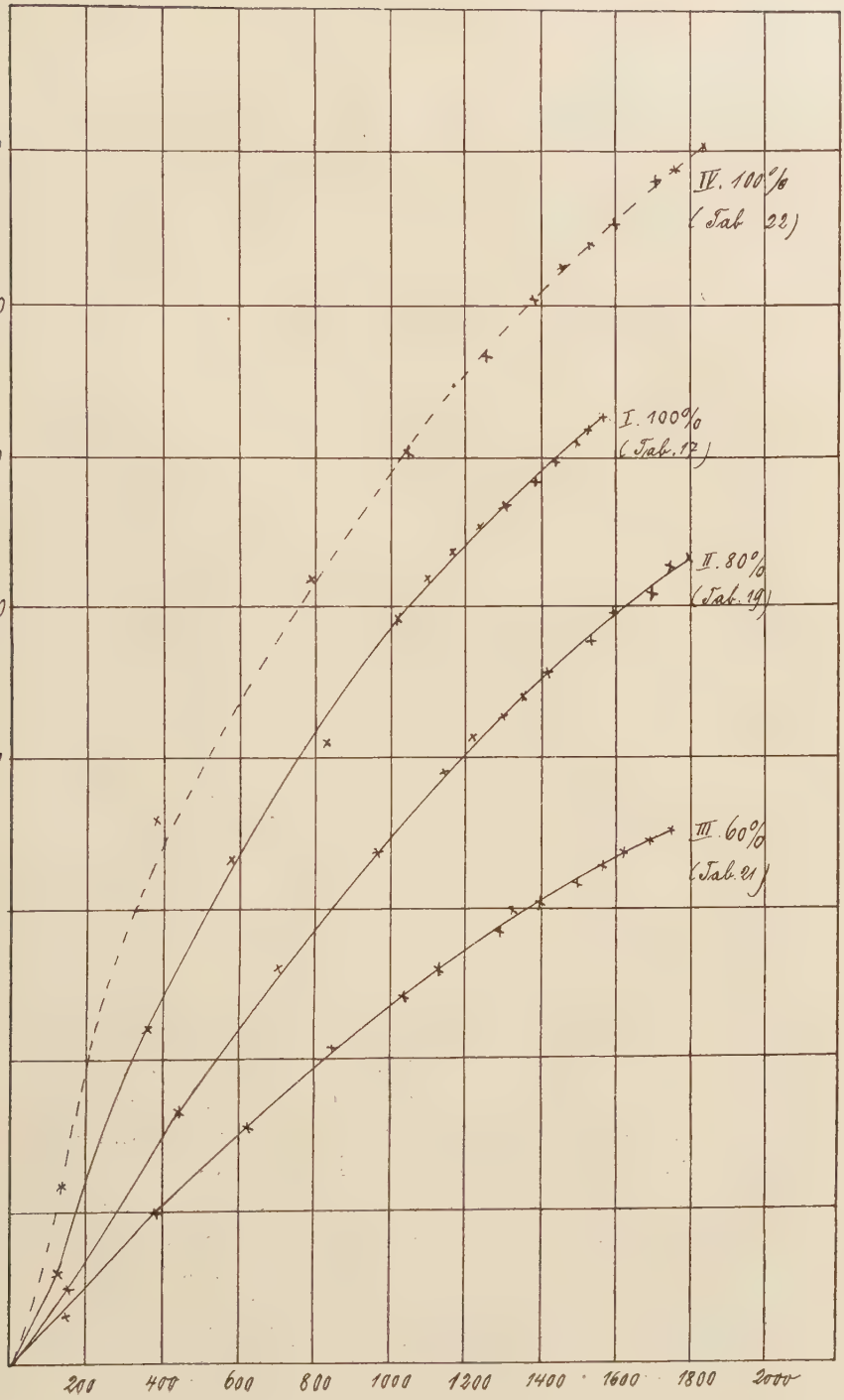
Eine tabellarische Übersicht der Resultate der zuletzt beschriebenen Versuche habe ich ebenfalls im Anhang gegeben. Die erste Rubrik enthält die magnetisierenden Feldstärken H; dann folgen die diesen Werten entsprechenden Magnetisierungen J. In der letzten Rubrik endlich habe ich die mit 10^4 multiplizierten Werte der Suszeptibilität $\varkappa = \frac{J}{H}$ angefügt.

Nun wird die erste Gruppe der beschriebenen Versuche durch die Tabellen 17—21 umfaßt, und Fig. 4 enthält die graphische Aufzeichnung der Zahlen einiger Tabellen.

Bei Versuchsreihe 17 verwendete ich reines Eisenpulver, bei 18 enthielt die Mischung 90 % Eisen und 10 % Kupferbronze, bei 19 80 % Eisen und 20 % Kupferbronze u. s. w. Stärkere Verdünnungen als die Mischung, die 60 % Eisen und 40 % Bronze enthielt, hatte ich bei den Versuchen mit der Magnetometermethode wegen der relativ sehr geringen auftretenden Magnetisierungen nicht mehr untersuchen können. Und, wiewohl die zuletzt beschriebenen Versuche der Untersuchung in dieser Beziehung nicht so schnell eine Grenze gesetzt hätten, ging ich doch auch hier in der Verdünnung einstweilen nicht über die angegebene Grenze hinaus, da es mir vorerst nur darum zu tun war, einige verschieden konzentrierte Mischungen von Eisenpulver überhaupt auf ein Maximum der Magnetisierung zu bringen.

War nämlich die Aufgabe gelöst für reines Eisenpulver, dann war sie voraussichtlich auch für beliebig konzentrierte Gemische mit unmagnetisierbaren Pulvern gelöst; denn schon die ersten Versuche ließen es sehr wahrscheinlich erscheinen, daß der Sättigungswert um so tiefer lag, je größer die Verdünnung war, und gleichzeitig, daß dieser Sättigungswert mit um so geringerer Feldstärke erreichbar sein würde, als die Verdünnung des Eisenpulvers fortschritt. Diese Vermutungen ließen sich schon jetzt durch den Anblick der in Fig. 4 aufgezeichneten Kurven rechtfertigen. Die magnetisierenden Feldstärken H sind, wie bisher stets, als Abszissen und die erreichten Magnetisierungen J als Ordinaten aufgetragen.

Überraschend war nun der Umstand, daß das Resultat der


IV. 100%
(Tab 22)
I. 100%
(Tab. 17)
II. 80%
(Tab. 19)
III. 60%
(Tab. 21)
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000

Figur 4.

ersten Versuche mit dem Elektromagneten zwar schon ein deutliches Zustreben auf ein Maximum der Magnetisierung des Eisenpulvers erkennen ließ, allein zur Erreichung einer vollkommenen Sättigung genügte offenbar auch die bisher angewandte größte magnetisierende Kraft noch immer nicht, trotzdem sie beiläufig zehnmal so groß war als die mit der Stromspirale bei der Magnetometermethode erreichten stärksten Felder. Da ich den Elektromagneten jedoch bereits bis zu seiner Höchstleistung beansprucht hatte, so blieben nur mehr zwei letzte Hilfsmittel übrig, um eine weitere Steigerung der magnetisierenden Felder zu erzielen.

Fürs erste nämlich zeigt ein Vergleich der mit der Magnetometermethode erhaltenen Kurven in Fig. 1 und 2 mit den Kurven I—III in Fig. 4, daß die letzteren gegenüber den ersteren in dem oben beschriebenen Sinn beträchtlich von links nach rechts verschoben sind. Da die in der kleinen Probespule eingeschlossenen und zwischen den Polschuhen des Elektromagneten eingeklemmten Stäbchen aus Eisenpulver ein viel kleineres Dimensionsverhältnis $\frac{l}{d}$ besaßen als die bei den Versuchen mit dem Magnetometer verwendeten Stäbe, so war dies nach den in Abs. 7 gemachten Ausführungen leicht erklärlich. Die Verschiebung der Kurven bewies eben, daß der magnetische Widerstand der das Pulver von der unmittelbaren Berührung mit den Polschuhen abschließenden dünnen Glasplatten noch groß genug war, um die entmagnetisierende Gegenwirkung der durch die Induktion entstehenden Stabpole noch kräftig zur Geltung zu bringen.

Da nun die mit der Magnetometermethode erzielten Kurven infolge der bei der Berechnung in Abzug gebrachten Entmagnetisierung in erster Annäherung den untersten, allerdings nur sehr geringen Teil der Normalkurve für das Eisenpulver darstellen, so mußte es durch eine Verminderung des magnetischen Übergangswiderstandes zwischen Pulverstäbchen und Polschuhen erreichbar sein, die Felder des Elektromagneten für die Magnetisierung noch besser auszunutzen und dadurch die resultierende Kurve rückverschiebend der Normalkurve zu nähern.

Tatsächlich hatte ich, wie die in Fig. 4 noch aufgezeichnete Kurve IV zeigt, den gewünschten Erfolg dadurch erreicht, daß

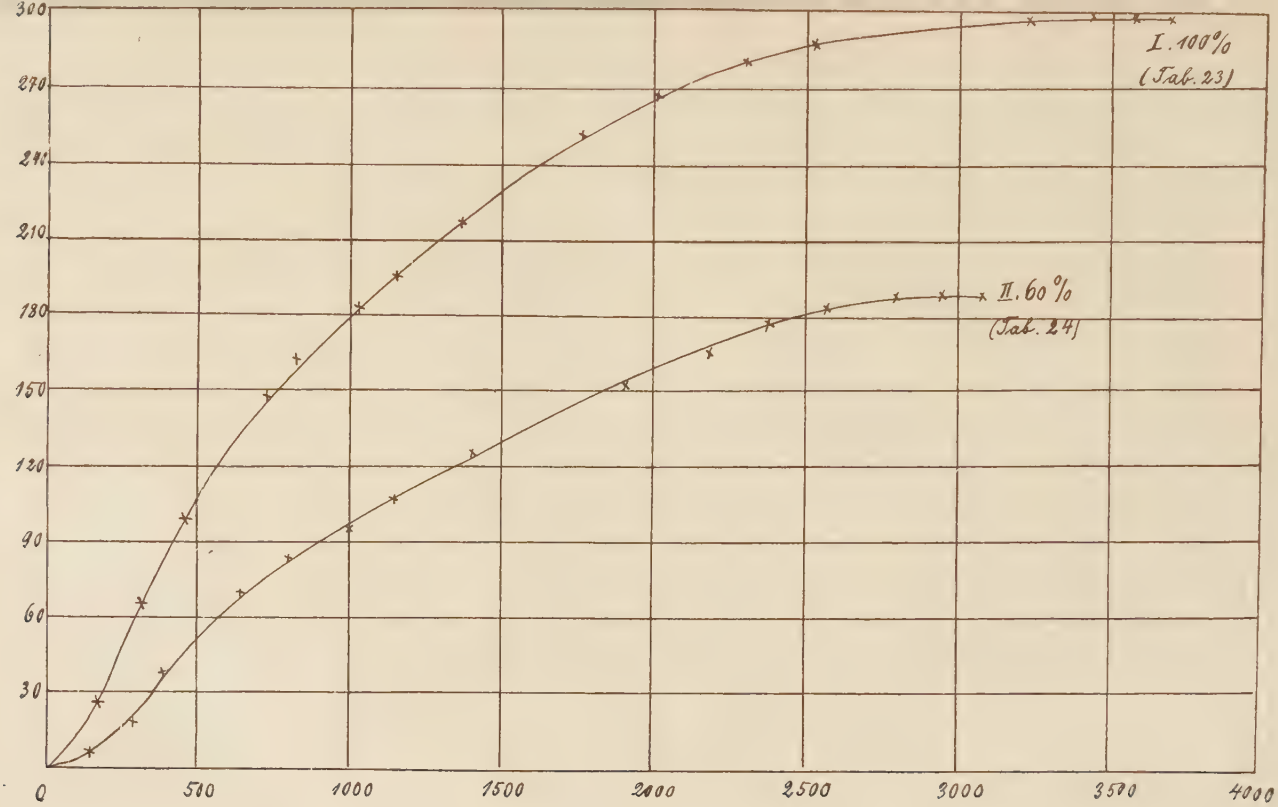
ich die Glasplatten der das reine Eisenpulver enthaltenden Probespule durch ganz dünne Blättchen aus Eisenblech ersetzte. Dadurch mußte entschieden ein besserer Kraftlinienschluß und mit der Verringerung der Entmagnetisierung eine Verschiebung nach links eintreten, und der Erfolg bestätigte diese Überlegung. Selbstredend hatte ich mich vorher durch Kontrollversuche davon überzeugt, daß die Ersetzung der Glasplatten durch die Blättchen aus Eisenblech an sich keinen Einfluß auf die Angaben des Galvanometers hatte.

Daß der untere Teil der so erhaltenen Kurve trotzdem noch nicht ganz mit den durch die Magnetometermethode erzielten Kurven für reines Eisenpulver einstimmt, kann weiter nicht wundernehmen: denn nach den in Abs. 6 gemachten Auseinandersetzungen konnte ja die Berechnung der Entmagnetisierung immer nur mit einiger Unsicherheit geschehen, und außerdem blieb ja immer noch der magnetische Widerstand der Fugen zwischen den Eisenblättchen und den Polschuhen, der sich sehr wohl noch geltend machen konnte, da selbst Unregelmäßigkeiten wie Risse oder Sprünge bei geschlossenen Toroiden aus massivem Eisen sich auf diese Weise noch verraten können[1]).

Um nun noch einen Schritt weiter zu kommen, blieb mir nichts anders mehr übrig, als eine nochmalige Steigerung der magnetisierenden Felder durch ein näheres Zusammenrücken der Polschuhe des Elektromagneten und eine dementsprechende Verkürzung der kleinen Probespulen herbeizuführen. Die dadurch bedingte abermalige Verkleinerung des Dimensionsverhältnisses $\frac{l}{d}$ der Pulverstäbchen äußerte sich freilich infolge des trotz der eisernen Abschlußblättchen bei schwachen magnetisierenden Feldern immer noch unvollkommenen Kraftlinienschlusses sofort wieder in einer Rechtsverschiebung der resultierenden Kurve I in Fig. 5, wie ein Vergleich des unteren Teiles dieser Kurve mit der zuletzt besprochenen Kurve IV in Fig. 4 zeigt.

Die Betrachtung der Kurve I in Fig. 5 zeigt nun, daß es

[1]) Vgl. H. du Bois, Magnetische Kreise, Berlin und München 1894, § 16, S. 25.


300
270
240
210
180
150
120
90
60
30
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
I. 100%
(Tab. 23)
II. 60%
(Tab. 24)

Figur 5.

jetzt vollkommen gelungen war, den Verlauf der Magnetisierung für das reine Eisenpulver bis zu seiner Sättigung zu verfolgen. Der Sättigungswert der Magnetisierung J betrug etwas weniger als 300 C.G.S.-Einheiten.

Der nun folgende analoge Versuch mit einer Pulvermischung aus 60 % Eisen und 40 % Kupferbronze ergab als Resultat die Kurve II in Fig. 5. Sie zeigt den Sättigungswert 190, und somit war der Beweis erbracht, daß

1. bei gleicher magnetisierender Kraft die Magnetisierung des reinen Eisenpulvers stets größer ist als die der weniger dichten Masse, und daß dementsprechend

2. der Sättigungswert des reinen Eisens höher liegt als der Sättigungswert des durch Beimengung unmagnetisierbaren Pulvers verdünnten.

Dabei ist jedoch ausdrücklich hervorzuheben, daß bei Aufstellung dieser und der folgenden Sätze zunächst stets das auf die Volumeinheit bezogene Moment als Maß für die Magnetisierung (J) zu betrachten ist.

Bezeichnen nämlich J_1 und J_2 bezw. die aus Fig. 5 entnommenen Magnetisierungswerte der Kurve I und II für gleiche magnetisierende Kräfte, und bildet man die zu den eingeschriebenen Abszissenwerten gehörigen Quotienten $\frac{J_1}{J_2}$, so ergeben sich die Zahlen der folgenden Tabelle.

H	$\frac{J_1}{J_2}$	H	$\frac{J_1}{J_2}$	H	$\frac{J_1}{J_2}$
200	2,46	1200	1,81	2200	1,59
300	2,30	1300	1,77	2300	1,57
400	2,22	1400	1,76	2400	1,56
500	2,15	1500	1,74	2500	1,55
600	2,14	1600	1,714	2600	1,55
700	2,10	1700	1,710	2700	1,55
800	2,01	1800	1,67	2800	1,55
900	1,96	1900	1,66	2900	1,55
1000	1,91	2000	1,64	3000	1,55
1100	1,85	2100	1,61	3100	1,55

Für $H < 200$ habe ich den Quotienten $\frac{J_1}{J_2}$ deshalb nicht mehr gebildet, weil derselbe infolge der relativ kleinen Werte

von J_1 und J_2 in diesem untersten Intervall jedenfalls nicht mehr als genau hätte betrachtet werden dürfen. Indes zeigt die Tabelle deutlich, daß der Quotient $\frac{J_1}{J_2}$ mit steigender Magnetisierung stetig abnimmt, bis er schließlich den konstanten Wert 1,55 erreicht.

Es erscheint demnach wohl ausgeschlossen, daß bei unbegrenzter Weitersteigerung der magnetisierenden Kraft H das betrachtete Verhältnis jemals den Wert $\frac{J_1}{J_2} = 1$ annehmen könnte, was offenbar der Fall sein müßte, wenn die dem verdünnten Eisenpulver zugehörige Kurve II ihren Sättigungswert mit der Kurve I für reines Eisen gemeinsam hätte.

Am klarsten läßt sich nunmehr das hieraus sich ergebende Gesamtresultat dadurch ausdrücken, daß man an Stelle der Magnetisierung J die jeweilig entsprechenden Werte der Suszeptibilität $\varkappa = \frac{J}{H}$ in den Kreis der Betrachtungen zieht. Nach Ausweis der die Werte $\varkappa = \frac{J}{H}$ enthaltenden letzten Rubrik der Tabellen 17 bis 24 des Anhangs ergibt sich nämlich in Übereinstimmung mit den bisherigen Ausführungen, daß die Suszeptibilität des Eisenpulvers mit zunehmender Verdünnung stets abnimmt. Gerade im entgegengesetzten Sinne wirkt aber eine Vergrößerung des Dimensionsverhältnisses $\frac{l}{d}$ der zu untersuchenden Stäbe, wenn man die Dichte des Pulvers unverändert läßt, da man nach den Angaben des Abs. 7 in diesem Falle stets eine Erhöhung der Suszeptibilität erhält. Im Zusammenhalt mit dem oben abgeleiteten Ergebnis, daß eine Veränderung der Dichte unzweifelhaft immer eine Verschiebung des Sättigungswertes der Größe J bewirkt, muß weiter gefolgert werden, daß beide Veränderungen, nämlich Änderung der Dichte und Änderung des Dimensionsverhältnisses $\frac{l}{d}$, hinsichtlich ihres Einflusses auf den Verlauf der Magnetisierung wesentlich verschieden und überhaupt nicht miteinander vergleichbar sind, soferne, um es noch einmal zu be-

tonen, das auf die Volumeinheit bezogene Moment als Maß für die Magnetisierung betrachtet wird. Denn eine Änderung des Dimensionsverhältnisses verschiebt niemals den in Einheiten dieses Maßes ausgedrückten Sättigungswert.

11. Verallgemeinerung der gewonnenen Resultate.

Dieses letzte, die Sättigungswerte von Eisenpulvern betreffende Resultat gewinnt ein besonderes Interesse durch den Vergleich mit den von zahlreichen Beobachtern klargestellten Magnetisierungsverhältnissen massiven Eisens in allen seinen typischen Gebrauchsformen.

Waltenhofen[1]) hatte nach der Magnetometermethode Stäbe aus Eisenpulver sowie aus kohärentem Stahl und Eisen untersucht und die unter gleichen Umständen sehr bedeutenden Unterschiede in der Magnetisierung des kohärenten Metalles und des Pulvers festgestellt. Zum Vergleich berechnete er jedoch, wie Börnstein, nicht die auf die Volumeinheit, sondern die auf gleiche Gewichte bezogenen magnetischen Momente, indem er seine Untersuchungen mit gleichschweren Stäben aus Eisenpulver und aus kohärentem Eisen anstellte. Für je drei Paare solcher Stäbe bildete er nun das Verhältnis der Magnetisierung des kohärenten Eisens und jener des Pulvers und fand für dieses Verhältnis stetig abnehmende Zahlen, wie ich sie analog für das Verhältnis der auf die Volumeinheit reduzierten Magnetisierungswerte verschieden konzentrierten Eisenpulvers festgestellt habe. An die Mitteilung seines Ergebnisses knüpft Waltenhofen nun die Bemerkung: „Ob diese stetig abnehmenden Zahlen die Einheit zur Grenze haben, d. h. ob jedem der Kurvenpaare je eine gemeinschaftliche Asymptote entspricht, ob also der Gewichtseinheit des pulverförmigen Eisens derselbe Grenzwert des Magnetismus zukommt, wie der des kohärenten Eisens (Stabeisens), — diese Frage läßt sich nach den vorliegenden Versuchen noch nicht mit einiger Sicherheit beantworten. Denkt man sich die Magnetisierung als eine Drehung magnetischer Moleküle, so könnte die im Sinne dieser Hypothese a priori gegebene Antwort wohl kaum anders als dahin ausfallen, daß der temporäre Magnetismus des pulver-

[1]) Wiedem. Annalen, Bd. VII, S. 421 ff. 1879.

förmigen Eisens keinen größeren, wohl aber vielleicht einen kleineren Grenzwert haben könne als der des Stabeisens."

Nun ist strenge festzuhalten, daß die ältere Definition des Begriffes der Magnetisierung, von welcher sowohl Börnstein als Waltenhofen ausgeht, sich wesentlich unterscheidet von der jetzt gewöhnlichen Definition, nach welcher nicht das auf die Gewichtseinheit, sondern das auf die Volumeinheit entfallende Moment als Maß für die Magnetisierung angesehen wird.

Dementsprechend läßt sich die von Waltenhofen und mutatis mutandis auch von Börnstein aufgestellte Frage von zwei verschiedenen Gesichtspunkten aus betrachten, je nachdem man die eine oder die andere Definition annimmt.

Da ich nun für die auf die Volumeinheit reduzierten Momente verschieden dichten Pulvers mit genügender Sicherheit eine Verschiedenheit der Sättigungswerte nachgewiesen hatte, so lag die Frage nahe, wie sich das Verhältnis der Magnetisierungen nach einer Reduktion meiner Zahlen auf gleiche Gewichtsmengen gestalten würde. Leider war jedoch eine direkte genaue Bestimmung der Gewichtsmenge Eisen, welche sich bei meinem letzten Versuch in der 60%igen Mischung des untersuchten Pulverstäbchens befand, nicht möglich, so daß ich den Reduktionsfaktor nur mit einiger Unsicherheit aus dem Prozentsatz der Mischung und dem Gewicht des Pulverstäbchens berechnen konnte. Es ergaben sich auf diese Weise für das oben betrachtete Verhältnis $\frac{J_1}{J_2}$ Werte, die im Minimum 0,9 erreichten und dann konstant blieben.

Es ist nun einerseits sicher anzunehmen, daß dieser Minimalwert infolge der Unsicherheit der Berechnung zu klein ausfiel, aber andrerseits ist sehr zu bezweifeln, ob der genaue Wert mit der Einheit zusammenfällt. Wäre dies der Fall, so läge hierin eine Bestätigung der von Börnstein ausgesprochenen Vermutung, daß unter Voraussetzung gleicher Gewichtsmengen des Metalles das reine Eisenpulver denselben Sättigungswert besitze wie das durch Beimengung unmagnetisierbaren Pulvers verdünnte. Hieraus ergäbe sich ferner begründeter Anlaß, auch die von Waltenhofen angezogene Frage, ob die magnetischen Momente gleicher Gewichtsmengen von kohärentem Stab-

eisen und Eisenpulver denselben Sättigungswert besitzen, in bejahendem Sinne zu beantworten, da ja das Eisenpulver wieder als ein bestimmter Verdünnungsgrad des kohärenten Stabeisens angesehen werden kann.

Nach den, allerdings mit einem gewissen Vorbehalt gemachten, Angaben Waltenhofens ist es jedoch sehr wahrscheinlich, daß die tatsächlichen Ergebnisse einer Vergleichung der magnetischen Momente gleicher Gewichtsmengen von Stabeisen und Eisenpulver in der Nähe ihres Sättigungswertes zu einer Entscheidung in entgegengesetztem Sinn führen würden. Ich vermochte leider nicht festzustellen, ob von seiten Waltenhofens oder anderer Beobachter neuere Untersuchungen vorliegen, die sich auf den Vergleich der Momente gleicher Gewichtsmengen beziehen, da alle mir bekannt gewordenen neueren Arbeiten das auf die Volumeinheit bezogene Moment zur Vergleichsgrundlage benutzen, worüber unten noch zusammenfassende Angaben folgen werden.

Zunächst ist aber als feststehend noch hervorzuheben, daß nach den Beobachtungen Waltenhofens das pulverförmige Eisen bei gleicher magnetisierender Kraft stets ein viel geringeres magnetisches Moment aufweist als die gleiche Gewichtsmenge massiven Stabeisens. Ebenso fand Waltenhofen, wie bereits erwähnt, für locker liegendes Eisenpulver kleinere Werte als für gleichschwere Proben von ebensolchem, das durch Zusammenklopfen verdichtet war, und analog fand ich nach den in Abs. 7 gemachten Angaben ebenfalls für das durch Beimengung unmagnetisierbarer Substanz verdünnte Eisenpulver nach Reduktion auf gleiche Gewichtsmengen Eisen stets kleinere Werte als für das reine Eisenpulver.

Die neueren Arbeiten, welche für die magnetische Untersuchung massiven Eisens nicht das auf die Gewichts-, sondern das auf die Volumeinheit bezogene Moment als Vergleichsgrundlage benutzen, liefern im Vergleich mit den auf derselben Grundlage von mir abgeleiteten Sätzen über das magnetische Verhalten von Eisenpulver eine mit der obigen vollkommen übereinstimmende Abstufungsreihe für die Magnetisierungsunterschiede von massivem Eisen als oberstem und verdünntem Eisenpulver als unterstem Dichtegrad. Dies spricht wohl dafür, daß die Vergleichung der Momente gleicher Gewichts-

mengen auch bezüglich der Sättigungsverhältnisse zu denselben Ergebnissen geführt haben würde wie die bei den neueren Untersuchungen bevorzugte Vergleichung der Momente gleicher Volumteile. Dadurch erhält dann auch der im vorigen Absatz abgeleitete Satz über den Unterschied des Einflusses von Änderungen des Dimensionsverhältnisses und Änderungen der Dichte allgemeine Gültigkeit.

Die in der bereits mehrfach zitierten Monographie von Ewing gemachten Angaben über die in C.G.S.-Einheiten ausgedrückten und auf die Volumeinheit bezogenen Sättigungswerte von Gußeisen, Schmiedeeisen und Stahl[1]) führen nämlich in Vereinigung mit meinen in derselben Maßeinheit ermittelten Sättigungswerten für verschieden dichtes Eisenpulver zu der folgenden klaren Übersicht.

Material	Ungefährer Sättigungswert	Notwendige magnet. Kraft	Bemerkungen
Schmiedeeisen . . .	1700	2000	Mittelwerte für 3 verschiedene Sorten
Stahl	1590	18180	Mittelwerte für 7 verschiedene Sorten
Gußeisen	1240	4000	
Reines Eisenpulver . (leicht zusammengepreßt)	296	3660	
Eisenpulver, verdünnt mit 40% Kupferbronze (leicht zusammengepreßt)	190	3070	

Die durch das magnetische Moment der Volumeinheit gemessenen Sättigungswerte des Eisenpulvers sind also bedeutend kleiner als diejenigen des massiven Eisens und, wenn man das massive Eisen lediglich durch seinen höheren Dichtegrad von dem Eisenpulver unterscheidet, so führt dies zu dem allgemeinen Satz:

Der magnetische Sättigungswert des Eisens sinkt mit abnehmender Dichte desselben.

Ob sich allerdings auch für die verschiedenen Darstellungsformen des massiven Eisens als Schmiedeeisen, Stahl und

[1]) Vgl. Ewing, Magn. Ind. etc., 7. Kap., S. 128 ff.

Gußeisen ein vollkommener Parallelismus zwischen ihren Dichteunterschieden und den Unterschieden ihrer magnetischen Sättigungswerte nachweisen läßt, vermag ich nicht zu entscheiden. Immerhin ist es bemerkenswert, daß dem Gußeisen, welches durchschnittlich eine geringere Dichte besitzt als Schmiedeeisen und Stahl, auch ein wesentlich geringerer magnetischer Sättigungswert zukommt als diesen beiden letzteren, für welche sowohl die Unterschiede der Dichte als auch diejenigen der magnetischen Sättigungswerte relativ gering sind. Doch haben auf die Magnetisierungs- und Sättigungsverhältnisse des massiven Eisens außer der Dichte bekanntlich noch zahlreiche andere, z. T. verwickelte Ursachen Einfluß. Merkwürdigerweise besitzt z. B. nach Ewing Bessemerstahl mit etwa 4% Kohlenstoff einen beträchtlich höheren magnetischen Sättigungswert als andere Stahlsorten mit viel geringerem Kohlenstoffgehalt.

Was schließlich die zur Erreichung der Sättigungswerte aufzuwendenden magnetisierenden Kräfte anlangt, so bestätigt sich die diesbezügliche Annahme Börnsteins.

In der Tat wird der Sättigungswert für reines Eisenpulver erst später erreicht als für das durch Beimengung unmagnetisierbarer Substanz verdünnte.

Für die Dichteunterschiede von massivem Schmiedeeisen, Gußeisen und Stahl gilt dieser Satz dagegen keinesfalls, vielmehr scheinen nach Ausweis der einschlägigen Literatur Dichteunterschiede in dieser Hinsicht gegenüber den Wirkungen anderer Veränderungen nur von sehr geringem Einfluß zu sein.

12. Übersicht der Resultate.

1. Die Magnetometermethode ist auch für die Untersuchung von pulverförmigem Eisen unzureichend, wenn es sich darum handelt, den Verlauf der Magnetisierung bis zur Sättigungsgrenze zu verfolgen.

Ferner gelten, ohne Rücksicht darauf, ob die magnetischen Momente gleicher Volumteile oder gleicher Gewichtsmengen verglichen werden, die folgenden Sätze:

2. Bei gleicher magnetisierender Kraft ist die Mag-

netisierung und die Suszeptibilität reinen Eisenpulvers stets größer als diejenige einer Mischung von Eisenpulver mit unmagnetisierbarer Substanz.

3. Dementsprechend liegt der magnetische Sättigungswert reinen Eisenpulvers stets höher als der Sättigungswert des verdünnten.

Unterscheidet man das massive Stabeisen von dem pulverförmigen Eisen lediglich durch den Dichtegrad, so lassen sich diese Sätze unter Beachtung der im vorigen Absatz gemachten Einschränkungen verallgemeinern, d. h.

4. Die Magnetisierung des Eisens sinkt cet. par. mit seiner Dichte, und
5. Der magnetische Sättigungswert des Eisens ist dementsprechend um so kleiner, je geringer seine Dichte ist.
6. Die zur Erreichung des magnetischen Sättigungswertes nötige magnetisierende Kraft ist für reines Eisenpulver größer als für verdünntes. (Eine Verallgemeinerung auf die für massives Eisen geltenden Verhältnisse läßt dieser Satz nicht zu.)
7. Änderungen in der Dichte des zu untersuchenden Eisenmaterials sind bezüglich ihres Einflusses auf den Verlauf der Magnetisierung wesentlich verschieden und deshalb auch nicht vergleichbar mit Änderungen des Dimensionsverhältnisses der zylindrischen oder ellipsoidischen Form, in welcher das Material untersucht wird.

Wenn die Ergebnisse vorliegender Arbeit in einigen wesentlichen Punkten als eine definitive Klarstellung der in der älteren Arbeit von Börnstein berührten Fragen angesehen werden dürfen, so schreibe ich diesen Erfolg lediglich den bedeutenden Hilfsmitteln zu, welche mir in der Benutzung der neueren Fachliteratur und in der liebenswürdigen Unterstützung meiner verehrten Lehrer am hiesigen physikalischen Laboratorium zur Verfügung standen. Den Herren Prof. Dr. E. Wiedemann, Prof. Dr. G. C. Schmidt, Prof. Dr. A. Wehnelt und Dr. R. Reiger spreche ich deshalb an dieser Stelle noch meinen herzlichsten Dank aus.

Anhang: Tabellen.

Versuchsreihe A.

Tabelle 1.
(100 % Eisen.)

H	J
12,61	5,43
31,12	11,96
45,78	17,56
59,37	25,11
75,67	32,63
87,85	39,16
100,87	48,93
117,69	54,38
137,45	63,07
153,42	70,68
173,61	78,28
181,58	84,79

Tabelle 2.
(95 % Eisen.)

H	J
21,04	5,43
38,30	9,78
53,02	15,22
70,26	19,58
87,09	25,01
97,61	30,46
117,0	34,8
147,28	43,5
170,83	52,29
188,45	56,55

Tabelle 3.
(90 % Eisen.)

H	J
19,15	4,01
37,05	7,61
54,30	11,96
69,44	16,31
84,59	20,67
99,75	25,01
113,17	28,28
126,26	32,63
137,58	35,89
156,96	40,24
137,82	45,68
191,01	50,03

Tabelle 4.
(85 % Eisen.)

H	J
19,79	3,23
39,58	6,54
57,26	9,78
73,26	11,96
88,83	15,22
102,7	17,55
116,2	20,67
129,7	23,91
141,0	27,19
158,7	30,46
178,1	34,80
193,6	38,07

Tabelle 5.
(80 % Eisen.)

H	J
20,22	2,14
38,51	3,88
54,76	6,1
85,91	11,96
100,36	12,81
114,1	15,22
127,99	17,55
139,5	20,67
157,5	22,84
189,5	27,19
199,14	29,37

Tabelle 6.
(75 % Eisen.)

H	J
22,34	2,14
40,88	3,23
58,97	5,43
77,08	7,61
93,09	9,78
111,02	11,96
139	16,31
153,4	17,17
175,6	19,58
197,5	22,84
216,9	27,19
232,5	30,46

Tabelle 7.
(70 % Eisen.)

H	J
41,31	2,14
59,58	3,88
77,51	6,54
93,95	7,61
110,0	9,78
124,3	10,64
140,7	11,96
152,5	14,14
172,7	16,31
195,4	17,55

Versuchsreihe B.

Tabelle 8.
(100 % Eisen.)

H	J
31,06	12,76
48,25	21,28
63,64	28,37
80,98	36,17
96,1	44,67
109,3	51,76
121,8	58,13
133,9	65,21
147,6	70,81
158,8	77,23
178,5	84,29
187,3	92,05

Tabelle 9.
(95 % Eisen.)

H	J	J'
31,34	11,45	12,02
52,62	20,57	21,59
68	27,66	29,04
85,34	35,46	37,23
102,9	42,40	44,52
116,1	49,63	52,11
129,4	56,72	59,55
145,0	63,08	66,23
158,6	68,04	71,44
176,0	75,81	79,60
197,5	84,29	88,50

Tabelle 10.
(90 % Eisen.)

H	J	J'
31,65	9,93	11,61
51,84	16,1	18,83
67,52	19,86	23,23
83,20	27,1	31,70
100,6	33,33	38,99
116,2	39,01	45,64
129,8	44,67	55,26
143,5	49,63	58,06
157,4	53,88	63,03
176,6	60,25	70,49
194,6	67,33	78,77

Tabelle 11.
(85 % Eisen.)

H	J	J'
29,87	8,36	10,27
50,02	12,77	15,70
63,46	19,15	23,57
81,23	24,83	30,54
97,01	29,79	36,64
110,8	34,75	42,74
124,5	39,71	48,84
144,2	46,09	56,69
156,2	49,63	61,04
188,4	56,72	69,76
197,9	61,67	75,85

Tabelle 12.
(80 % Eisen.)

H	J	J'
30,17	6,94	9,16
50,30	11,45	15,11
66,30	15,59	20,57
81,68	22,70	29,96
97,8	26,25	34,65
111,8	29,79	39,32
125,9	33,34	44,00
140,1	35,46	46,80
158,1	40,42	53,35
169,7	45,38	59,90
189,7	50,34	66,44
199,8	52,47	69,26

Tabelle 13.
(75 % Eisen.)

H	J	J'
28,17	6,076	8,61
46,40	9,929	14,10
68,41	15,59	22,13
82,27	19,86	28,20
96,5	22,70	32,23
112,5	26,25	37,27
124,5	29,79	42,30
136,5	32,63	46,33
154,5	37,59	53,37
172,5	41,84	59,41
190,6	46,09	65,44
198,6	48,22	68,47

Tabelle 14.
(70 % Eisen.)

H	J	J'
34,64	5,67	8,57
50,76	9,27	14,10
67,16	11,45	17,51
85,41	14,90	22,79
101,7	17,73	27,12
117,9	20,57	31,47
132,1	23,41	35,81
150,1	27,66	42,31
172,5	31,91	98,82
192,7	35,46	54,25
202,9	37,59	57,51

Tabelle 15.
(65 % Eisen.)

H	J	J'
30,73	4,26	7,02
51,24	6,94	11,45
67,47	9,93	16,38
83,74	12,77	21,07
102,2	15,59	25,72
116,4	17,73	29,25
130,8	19,86	32,76
145,0	21,99	36,28
159,7	22,51	37,14
177,7	26,95	44,46
198,2	29,79	49,15
204,2	31,21	51,49

Tabelle 16.
(60 % Eisen.)

H	J
30,73	4,26
49,14	6,94
65,52	9,22
81,91	11,45
98,2	14,19
114,6	16,32
128,8	19,15
141,0	21,28
157,4	23,41
169,6	25,54
185,9	28,37
204,1	31,91

Tabellen zu den Versuchen mit dem Elektromagneten.

Tabelle 17. (100 % Eisen.)

H	J	$\frac{J}{H} \cdot 10^4$
131	17,8	1349
357	66,1	1851
576	99,7	1732
833	123	1473
1012	148	1464
1092	157	1438
1151	162	1404
1231	167	1355
1290	171,5	1329
1389	176	1246
1448	180	1227
1489	184	1226
1529	186,5	1220
1555	188	1222

Tabelle 18. (90 % Eisen.)

H	J	$\frac{J}{H} \cdot 10^4$
158	17,8	1112
397	57,3	1443
635	95,01	1496
893	122	1321
1052	137,5	1307
1132	146,3	1293
1211	154	1272
1290	156,4	1212
1350	161,1	1193
1429	169,9	1189
1489	172,7	1160
1568	174	1109
1628	177,7	1086
1687	179	1076

Tabelle 19. (80 % Eisen.)

H	J	$\frac{J}{H} \cdot 10^4$
159	15,7	987
437	50,3	1152
695	78,9	1136
953	103	1049
1132	118	1042
1211	125	1030
1290	128	991
1350	133	982
1409	137	975
1528	143	936
1589	150	942
1687	153	907
1727	159	923
1787	160	847

Tabelle 20. (70 % Eisen.)

H	J	$\frac{J}{H} \cdot 10^4$
133	11,1	837
380	36,8	967
627	58,7	936
835	76,8	897
1045	90,2	862
1083	93	858
1197	100,3	837
1254	104,8	835
1331	109,5	823
1426	116,4	816
1521	117,9	775
1559	122,2	783
1616	123,4	663
1692	127,9	756

Tabelle 21.

(60% Eisen.)

H	J	$\frac{J}{H} \cdot 10^4$
152	7,8	512
380	29,5	776
627	46,1	734
855	62,3	728
1045	70,7	676
1143	76,4	668
1292	85,6	647
1330	89,7	643
1407	88,9	635
1502	95,1	633
1559	98,6	632
1616	101,3	627
1692	103	605
1730	106,7	595

Tabelle 22.

(100% Eisen.)

H	J	$\frac{J}{H} \cdot 10^4$
159	34,6	2180
378	107,9	2852
774	155,8	2013
1032	180,6	1750
1251	201	1607
1370	212,4	1551
1449	219,3	1514
1509	224	1485
1588	229	1442
1687	236,3	1401
1747	239	1369
1826	242,2	1327

Tabelle 23.

(100% Eisen.)

H	J	$\frac{J}{H} \cdot 10^4$
186,3	26,09	1400
310,5	68,68	2212
465,7	102,4	2199
714,1	150,9	2113
838,3	166,2	1982
1025	185,9	1814
1149	197	1715
1366	219,6	1608
1770	260	1480
2018	269,4	1335
2298	280,7	1222
2515	286,6	1139
3229	296,9	919
3416	302,9	887
3571	296,9	831
3664	295,9	807

Tabelle 24.

(60% Eisen.)

H	J
155,3	6,53
298,4	20,09
403,7	41,3
652,0	68,75
807,3	83,72
993,6	93,03
1149	107,8
1397	128
1894	157,6
2174	173,2
2360	182,5
2577	185,2
2795	191,9
2950	189,0
3074	189,6

Lebenslauf.

Ich, Hermann Walter Trenkle, prot. Konf., bin am 24. März 1880 in Bullenheim, Bezirksamts Marktbreit, geboren als Sohn des kgl. prot. Pfarrers David Theobald Trenkle und seiner Ehefrau Anna, geb. Struve. Nach der Versetzung meines Vaters nach Rothausen, Bezirksamts Königshofen i. G., besuchte ich daselbst die Volksschule 3 Jahre lang, worauf ich 1 Jahr lang Schüler der A. Thomsonschen Privatbürgerschule in Hamburg war. Vom Jahre 1890 bis 1892 besuchte ich dann die damalige isolierte Lateinschule zu Windsbach (Mittelfranken) und hierauf zuerst das kgl. alte Gymnasium in Regensburg und zuletzt das kgl. neue Gymnasium daselbst, an welchem ich im Jahre 1899 die Absolutorialprüfung bestand. Vier Semester war ich sodann Studierender an der kgl. technischen Hochschule zu München und schließlich sechs Semester an der kgl. Friedrich-Alexanders-Universität in Erlangen, woselbst ich mich dem Studium der Mathematik und Physik widmete. 1903 bestand ich den 1. Abschnitt und 1904 den 2. Abschnitt des Staatsexamens für das Lehramt der Mathematik und Physik in München.

In München hörte ich bei v. Dyck, Finsterwalder, v. Braunmühl, Burmester, Ebert, Föppl, Günther, v. Hoyer, v. Grove, Ultsch, v. Reinhardstoettner, v. du Moulin-Eckart; in Erlangen bei Wiedemann, Gordan, Noether, Schmidt, Wehnelt und Roemer.